社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.
SPS2005-09 (2005-06)

マイクロ波送電用均一振幅フェーズドアレイのビーム最適化

橋本　弘蔵† 　新島　壮平†,†† 江口　将史†,††† 松本　紘†

† 〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所
†† 現在、三菱重工業株式会社
††† 現在、三菱電機株式会社
E-mail: †kozo@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし　宇宙太陽発電所（SPS: Solar Power Satellite/Station）においては，サイドローブを減らし，受電点への高効率伝送を実現するために，送電アンテナに 10dB のガウス型の電力分布もたせることが考えられている。ところが中央で 10 倍多い電力となるため，熱設計に問題が生じている。そこで，均一振幅アレーを仮定し，高い電力収集効率と受電サイト以外の不要放射抑制を目指した低サイドローブの送電放射パタンの最適化を行う。低コスト化も期待できる。1 方向送電における最適化と 2 方向送電を可能にするマルチビーム形成の最適化を行った。

キーワード　ビーム制御，アレイアンテナ，パタン合成，宇宙太陽発電所，パレート最適解，多目的遺伝的アルゴリズム

Optimization of uniformly excited phased array for microwave power transmission

Kozo HASHIMOTO†, Souhei NIIJIMA†,††, Masashi EGUCHI†,†††, and Hiroshi MATSUMOTO†

† Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011
†† Now at Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
††† Now at Mitsubishi Electric Corp.
E-mail: †kozo@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract　For reduced sidelobes and efficient energy transmission, 10-dB Gaussian tapering is proposed for its transmitting array antenna for SPS (solar power satellite). This causes a problem on the thermal design since elements at the array center are excited strongly than those near the edge. Antenna radiation patterns are optimized for high transmission efficiency and low sidelobes under an uniformly excited array in order to solve the problem. This is expected to contribute cost reduction as well. Arrays are optimized for one and two direction transmissions.

Key words　beam control. array antenna, pattern synthesis, SPS, solar power satellite, pareto optimization, multi-purpose genetic algorithm.

1. 序　　論

宇宙太陽発電所（SPS: Solar Power Satellite/Station）においては，サイドローブを減らし，受電点への高効率伝送を実現するために，送電アンテナに 10dB のガウス型の電力分布もたせることが考えられている [1]。送電部をそのように設計すると放熱の難しい中央部で最大の電力となり発熱も多く，温度上昇をもたらすことが問題となっている [2], [3]。一方，等振幅励振でサイドローブを低下させる方法はすでに提案されている [4]。マイクロ波送電にとっては伝送効率（送電電力に対するアンテナ面での受電電力の割合) も重要な要素であるため，低サイドローブかつ高伝送効率を満たすアレイアンテナの最適化を行った。

2. マイクロ波送電ビームの要件

SPS でマイクロ波送電を行うにあたって，様々な条件を満たす必要がある。例えば受電部以外への放射を抑制して電力伝送損失を抑え，人体や通信へ影響を与えないようにすることや，コストをできるだけ抑えて，既存の商用電源価格と同等になるようにすることなどである。送電ビーム形成に関しては高効率でサイドローブを抑制した放射パターンの形成が要請される。

2.1 均一振幅励振

NASA のリファレンスモデルでは周波数として 2.45GHz を採用 [1] しており，静止衛星軌道上から地上の直径 10km の受電部へ送電するために必要なビームの精度は 0.001 °程度となっている。そのため SPS では莫大な素子数から成るアレイアンテナが採用されることになっている。5.8GHz を採用した場合には，より高い精度が要求される。アレイアンテナの放射パターンは，各素子アンテナの励振位相分布および励振振幅分布によって決まる。通信用のアレイアンテナでのビームフォーミングでは励振位相分布，励振振幅分布ともに可変として使用することが多い。しかし，本研究の対象とするアレイアンテナは電力伝送を目的とするものであり，今回励振振幅分布は均一に固定した状態を仮定する。均一に固定する理由は 3 つあり，(1) 放射効率の向上，(2) 構造・維持管理の容易さ，(3) 熱問題への対策である。

それぞれの理由は (1) 各素子アンテナに取り付けられる増幅器は入力によって効率が変化する。そのため，振幅分布を可変にすると増幅器を常に最大効率で使用できなくなることになり，放射効率が落ち，より多くの熱が発生する。(2) アレイアンテナにおいてサイドローブを抑制するための一般的な方法としては振幅テーパを設ける方法がとられる。NASA のリファレンスモデルにおいては 10dB のガウシアンテーパが考えられていた [1]。各素子の振幅分布を中心ほど大きく，端に行くほど小さくするという方法と，各素子の振幅を一定にして素子間隔を変化させる方法がある。しかしどちらの方法も構造が複雑となる。SPS を宇宙空間に輸送するにあたっては，経済的な観点より送電アンテナ部をユニット化して運搬することが考えられているが，その低コスト化にはできるだけ均一性が保たれている方が望ましい。(3) 振幅テーパを設けると中心部に熱が集中することになる [3]。排熱の問題は SPS における重要な課題の一つであり，熱の集中は望ましくない。その点振幅が均一であれば送電系において発生する熱の分布は均一になる。

3. SPORTS 5.8 におけるビーム最適化

3.1 SPORTS 5.8 の概要

SPORTS 5.8 (Space POwer Radio Transmission System with 5.8GHz) [5] は 2001 年度に本研究所に導入されたシステムである。このシステムはマイクロ波送電サブシステム，ビーム形成制御サブシステム，マイクロ波受電整流サブシステムの三つのシステムから成る。今回使用するビーム形成制御サブシステムはビーム形成部・パイロット信号送信部・パイロット信号受信部より成り，特にビーム形成およびビームの方向制御に主眼が置かれたシステムである。

本研究ではパイロット信号の到来方向が判明した後におけるビーム形成・制御を対象としているので，特にそのうちのビーム形成部を使用した。このビーム形成部の外観を図 1 に示す。このシステムは 12×12 素子の方形パッチアンテナを並べたフェイズドアレイシステムであり，増幅器としては半導体が用いられている。なお，使用したビーム形成サブシステムの仕様を表 1 に示す。

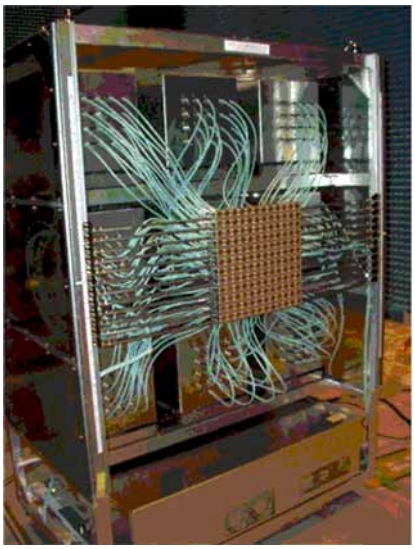


図 1　SPORTS 5.8(ビーム形成部) の外観

表 1　ビーム形成サブシステムの仕様 [6]

周波数	5.8GHz
電力	90W(9 ユニット合計)
増幅器	半導体 (FET)
位相制御	各素子に 4 ビット移相器 (分解能 22.5 °)
ビーム切替え速度	1ms 以下
直流-マイクロ波変換効率	約 10%
送電アンテナ	12 × 12 の 144 素子 円偏波方形パッチアンテナ
駆動電圧	直流 200V

3.2 放射パターンの最適化

3.2.1 最適化手法

放射パターンを最適化するにあたって，目的とするのはサイドローブの抑制および受電部における電力の最大化である。そのため，線形計画法や非線形計画法等の単一の目的関数を解空間内で最大あるいは最小にして最適点を求めるという数学的手法では不十分である。そこで，近年研究が数多く行われている多目的遺伝的アルゴリズム (GA：Genetic Algorithm) を用いた。これは GA が複数の個体を用いて解の探索を行うため，探索の各段階において個体評価における多目的性を直接取り扱うことができ，一度の探索でパレート最適解集合を求めることが可能なためである。パレート最適解集合とは，トレードオフの関係にある各目的に対して様々なバランスで良い評価値をとる解を全て含む解集合，言い替えれば，その解より全ての点において優れた解というものが存在しないような解の集合のことである。図 2 に 2 目的の場合における実行可能領域とパレート最適解集合の関係を示す。パレート最適解集合の特徴として，この解集合の中からどの要求を優先して解を選ぶか，それぞれの目的をどの程度のバランスで達成したものを選ぶか，設計者の意図を反映させることができる。

本研究で使用した多目的 GA は SPEA2(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) [7], [8] と呼ばれるものである。こ

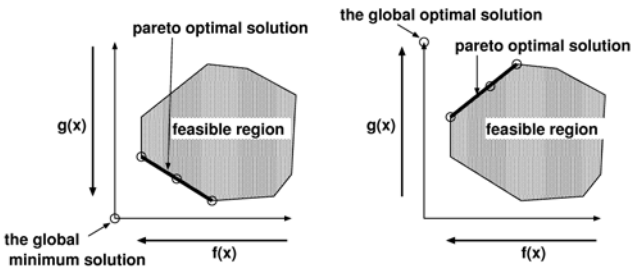


図 2　実行可能領域とパレート最適解

れは様々なテスト関数において他のアルゴリズムに比べて優位性が確認されており，現在最も優れたアルゴリズムの一つといえる。

一般的な GA におけるパラメータとしては，母集団サイズ・最大世代数・交叉率・交叉法・突然変異率・突然変異法がある。GA の解探索能力はこれらのパラメータに依存するが，今回の最適化においては交叉率・交叉法・突然変異率・突然変異法についてはデフォルトとして与えられている値 (交叉率=1.0，交叉法：1 点交叉，突然変異率=1/染色体長，突然変異法：ビット反転) を使用した。これらのパラメータは解の探索方法に影響するものである。しかし残りの母集団サイズおよび最大世代数については，デフォルトの値では十分なパレート最適解が得られなかったので変更した。

母集団サイズは GA における探索点の数を表し，探索点の数が多いと広い範囲を探索することが可能となるために最適解を発見しやすくなる。最大世代数はどれだけ深く探索を続けるかを表す。これらのパラメータが小さいと，パレート最適解集合の拡散の度合いが小さくなったり，得られる解が真のパレート最適解にまで達しないなど，十分なパレート最適解集合が得られなくなる。

SPORTS 5.8 は均一振幅励振であるので，最適化において変数とするのは各素子アンテナの励振位相 144 個である。パッチアンテナの放射パタンも考慮した計算方法により受電面での放射パターンを計算し，受電部における電力を最大にする関数，および MSLL (最大サイドローブレベル：Maximum Side Lobe Level) を最小にする関数の二つの目的関数を作成し，これを多目的 GA で走らせた。なお，受電部はメインビームの中心から半径 50cm の円内としている。また，計算時間の制約上，受電面については 4m×4m の領域について 101 × 101 のグリッドを設定して計算を行った。

3. 2. 2　最適化結果

アンテナの真正面をメインビームの中心とするようにした場合の，多目的 GA によって得られたパレート最適解を図 3 に示す。相対的に見るため，受電部の電力については全て同相で励振した場合を基準 (100%) に考える。全て同相の場合は図中右上の赤い点にあたり，MSLL は −12.68dB となっている。得られたパレート最適解のうちで MSLL を最も抑制した解というのは，受電部電力が 82.3%で MSLL = −19.31dB と，全て同相で励振するときに比べて MSLL は 6.6dB 抑えられた。

なお，この解の位相分布は図 4 のようになった。中心付近の

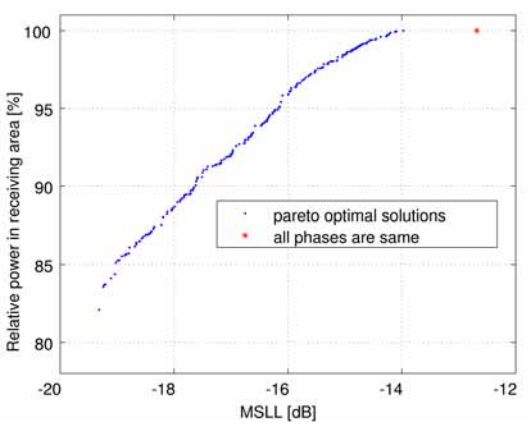


図 3　SPORTS5.8 の放射パターンの最適化におけるパレート最適解

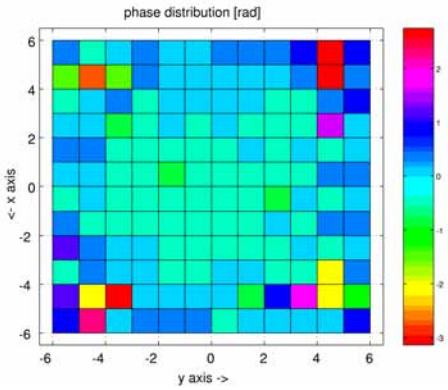


図 4　MSLL を最も抑制する解の位相分布。赤とブルー，黄と青ではほぼ逆相となる。

素子アンテナの位相分布はほぼ一様で，端の方の素子アンテナの位相が大きく変化している。端の素子アンテナのうちでも，特に角に近い素子アンテナでは中心部の素子アンテナおよびその周辺の素子アンテナと逆位相になっているものがある。これは主に中心部の素子アンテナが受電部電力に大きく寄与し，一方で端の方の素子アンテナは MSLL を抑えるためにサイドローブの電波を打ち消す役割を果たしているものと考えられる。

3. 2. 3　実験検証結果

最適化で得られた解の位相分布を SPORTS 5.8 に与え，実際にサイドローブを抑制した放射パターンが実現されているかどうか実験を行った。実験に使用した解は MSLL を最もよく抑制した解である。その結果は図 5 に示すとおりになり，理論計算値と測定値は十分一致して MSLL を抑制できていると言える。

また，メインビームの中心を 30cm 横に向けて最適化して得られたパレート最適解集合のうち，MSLL を最も抑制した解についても実際に SPORTS 5.8 に位相を与えて測定を行った。その結果の一部を図 6 に示す。こちらの結果も十分一致したものが得られており，メインビームの方向を変えた場合でも最適化が十分実現できていることがわかる。

SPORTS 5.8 における放射パターンの最適化を行った結果，期待どおり MSLL を抑制した放射パターンを得ることができた。正面方向だけでなく，ビームの方向を変化させても十分な

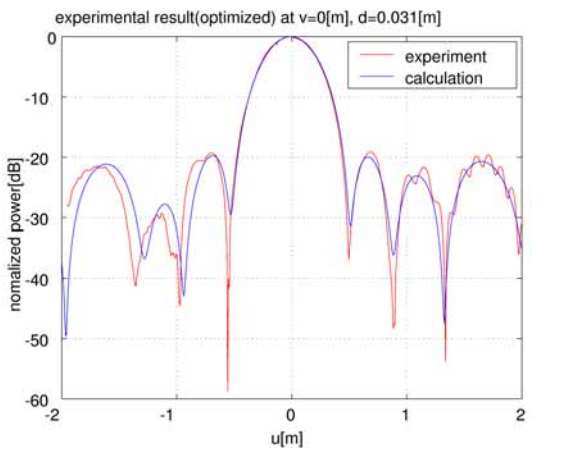


図 5　正面にビームを向けた場合に MSLL を最も抑制した解の計算値 (青) と測定値 (赤)

[v = 0.5m でのパターン]

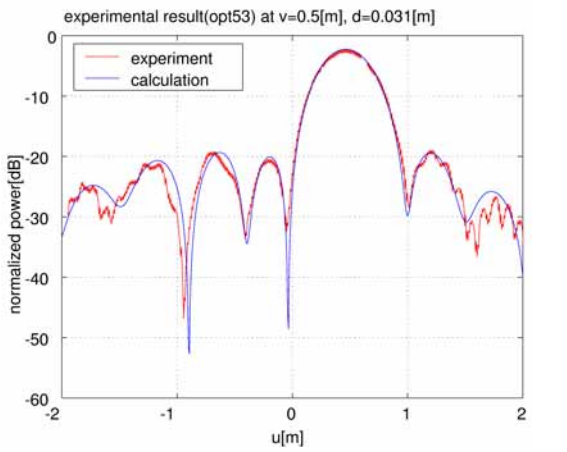


図 6　メインビームの中心を横に 30cm ずらして最適化したときの計算値 (青) と測定値 (赤)

結果が得られた。これにより，過去に行われてきた同様の手法を用いた研究結果の妥当性が証明されたと言える。また，方形パッチアンテナを用いるにあたって，素子間隔が 0.6λ のときは相互結合の影響はほとんどないと考えていいと言えるであろう。

最適化のための多目的 GA の計算には，本研究所の電波科学計算機実験装置の PC クラスターを用いた。このシステムは 24 台の計算ノードを持っており，それぞれのノードの性能は，CPU：PentiumIII 1.0GHz，メモリ：1GB，HDD：20GB となっている [9]。今回の最適化ではそのうちの 12 台を用いた。

正面方向の最適化において，十分なパレート最適解集合が得られるまでの計算時間は約 31 時間であった。このとき多目的 GA のパラメータは 母集団サイズ = 600，最大世代数 = 600 としている。今回は近傍界領域で測定を行うことが前提であったため，放射パターンを求めるための計算は複雑で時間のかかるものであった。但し，計算時間短縮のためのプログラムの改良などは特に行ってはいない。実際に SPS の莫大な素子アンテナ数でソフトウェアレトロディレクティブシステムを用いるにあたって，4 ビット，144 素子でこれだけの時間がかかるようでは実用にならない。これを実用化するにはさらなる計算機の性能向上，高速で効率の良い計算方法の開発などが必要である。

4.　移相器の分解能に応じたビーム最適化

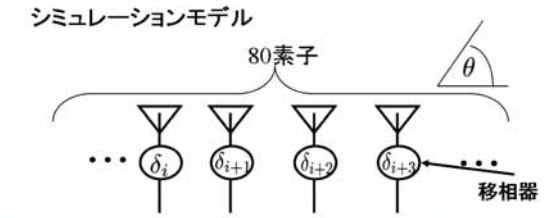
4.1　検証モデル

N 素子から成る直線アレイアンテナにおいて，端から n 番目のアンテナに流れる端子電流の振幅を I_n，位相を ψ_n とし，素子アンテナの指向性を $g(\theta,\phi)$ とする。この場合のアレイアンテナの指向性は次式で表される。

$$F(\theta,\phi) = g(\theta,\phi)\sum_{n=0}^{N-1} I_n \exp(j\psi_n)\exp(jnkd\cos\theta) \quad (1)$$

なお，d は素子間隔，k は波数である [10]。以降，解析を行う上で放射パターンを求める際にはこの式を使用する。

解析モデルとして，80 素子の一次元アレイアンテナを想定した。図 7 に示すように，素子間隔は 0.5λ，各素子の指向性すなわちエレメントファクタは，SPORTS 5.8 に用いられている方形パッチアンテナの指向性に近い $\sin\theta$ と仮定している。当然 SPS における影響を調べることが必要なので，ここでは遠方界領域において議論する。



アンテナ	80素子,1次元
所望方向	θ=90°（正面)、±1.3°で受電
アンテナ間距離	0.5λ
励振振幅	均一
素子アンテナ指向性	sin θ
移相器	各アンテナに3,4,5,20ビット

図 7　80 素子一次元アレイアンテナモデル

$\sin\theta$ の指向性のアンテナの放射パターンを図 8 に示す。また，過去にエレメントファクタによる放射パターンの最適化への影響が調べられており，図 9 に示すようにエレメントファクタが放射方向に鋭いほど効率がよく，MSLL を抑制できるという結果が得られている [11]。一方で $\sin^2\theta$ などエレメントファクタの指向性が強過ぎる場合，今度は相互結合の影響が大きく現れることになる。これらの点を踏まえるとエレメントファクタは $\sin\theta$ くらいが妥当だと言えるのでこれを採用する。

今回の解析においては簡単のため一次元アレイアンテナモデルを対象として考える。

4.2　評 価 手 法

移相器の分解能の影響を調べるにあたって，一次元アレイアンテナモデルの各素子アンテナに接続された移相器の分解能を変えながら放射パターンの最適化を行った。 正面方向にメインビームを向ける場合については計算時間の短縮のため，半分の

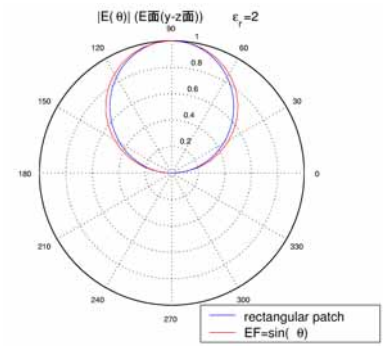


図 8　正方パッチアンテナ及びエレメントファクタが $\sin\theta$ のアンテナの放射電界パターン

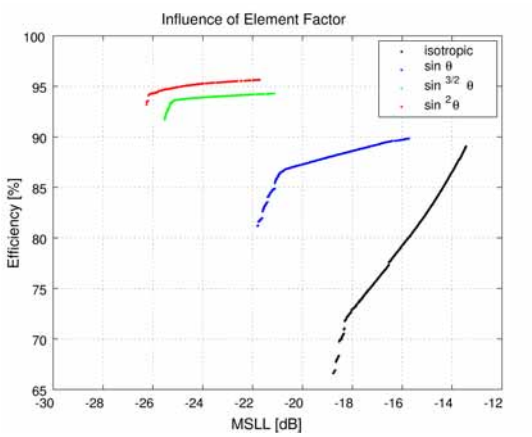


図 9　エレメントファクタの違いによる最適化への影響

40 素子の位相を最適化し，これを残りの 40 素子に対称に与えることとした。

最適化には SPORTS 5.8 における放射パターンの最適化と同様に多目的遺伝的アルゴリズムを用いた。ただし SPORTS 5.8 の時と異なる点として，放射パターンの計算は遠方界領域における計算のため式 (1) を用いており，角度に対する放射パターンが検討対象となっている。そのため，受電部はある角度範囲として考えている。また，目的関数については，MSLL の最小化は同じであるが，もう一方は受電部電力の最大化ではなく，0 °から 180 °までの全体に放射した電力のうち受電部とした角度範囲における電力の割合を効率と定義し，これを最も高くするようにしている。今回の最適化では受電部は所望方向から ±1.4 °以内とし，MSLL と認識する領域は所望方向に対して ±1.7 °より外側とした。これらの間に差があるのは，最適化を行って得られる MSLL を抑制した解ではメインビームの幅が広がるためである。

移相器については，20 ビットの移相器をアナログ移相器と同等の性能であると仮定し，20 ビットの場合と 3 ビット，4 ビット，5 ビットのそれぞれの場合について放射パターンの最適化を行った。最適化における多目的 GA のパラメータはそれぞれの場合においてある程度十分なパレート最適解集合が得られていると思われるものを採用した。

4.3　結　　果

まず，分解能の違いによるパレート最適解の違いを図 10 に示す。当然ながら 20 ビットでのパレート最適解が最も望ましい結果を示しており，以下移相器の分解能が高いほど望ましい結果を出していることが確認できる。

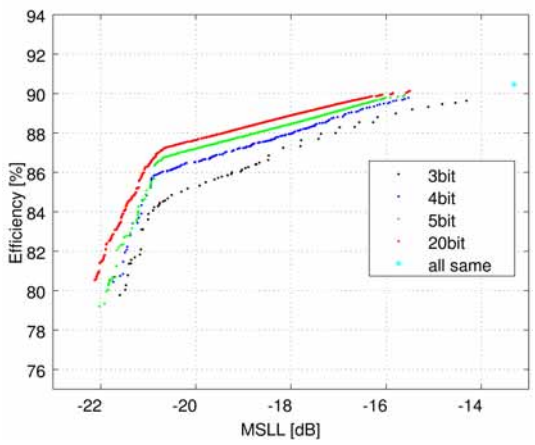


図 10　移相器の分解能によるパレート最適解の違い

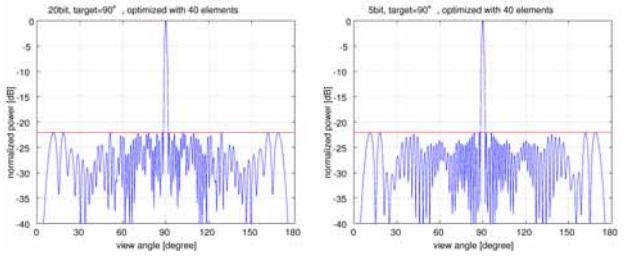
20 ビットの場合に MSLL を最も抑制した解は効率が 79.75%，MSLL = −22.04dB となっている。また，5 ビットの場合は効率 80.1%，MSLL = −22.00dB，4 ビットの場合は効率 80.83%，MSLL = −21.78dB，3 ビットの場合は効率 79.75%，MSLL = −21.60dB となっている。これらのときの放射パターンを図 11 に示す。また，比較のため全て同相で励振した場合の放射パターンを図 12 に示す。 どの場合も，MSLL を抑制する代償として全て同相で励振した場合に比べて素子アンテナの配列軸方向への放射が大きくなっている。図 11(b) に対応する位相分布を図 13 に示す。中央付近のアンテナの位相はほぼ一様で、端の方のアンテナの位相は大きく変化している。これは中央付近のアンテナが主にメインビームとして効率の向上に寄与し、端の方のアンテナはサイドローブを打ち消す役割を果たしているものと考えられる。

4.4　ビームの方向を変化させた場合

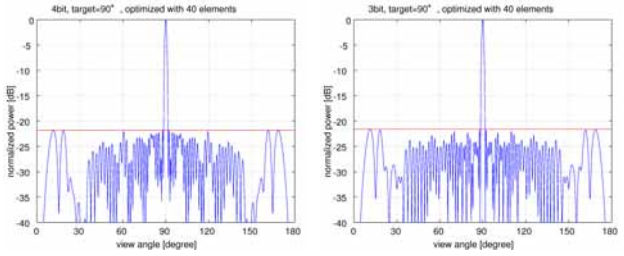
ビームの所望方向を 95 °に向けた場合について，同様に移相器の分解能による影響および位相のランダム誤差の影響を調べた。多目的 GA を用いて 95 °方向への放射が最大となるように最適化を行って得られたパレート最適解集合を図 14 に示す。正面方向に向けた最適化の場合と異なり，3 ビットではそれほどよい結果が得られていない。

4.5　検　　討

実際に用いられる移相器は 4 ビットや 5 ビット程度のものであり，20 ビットで最適化した結果は実際にそのまま使用することはできない。そこで 20 ビットで最適化して得られた解を元に，その位相分布を現実で使用されるビット数に丸めた場合を考えた。丸めの方法としては四捨五入と同様に取り得る値のより近い方に合わせることとした。正面方向へ放射するときについて，20 ビットで最適化した場合の MSLL を最も抑制した解について位相の丸めを行い，その結果と始めから低分解能で最適化を行った場合に MSLL を最も抑制した解とを比較する。まとめた結果を表 2 に示す。



(a) 20 ビット移相器　　(b) 5 ビット移相器



(c) 4 ビット移相器　　(d) 3 ビット移相器

図 11　正面方向に向けて最適化したとき最も MSLL を抑制した放射パター ン

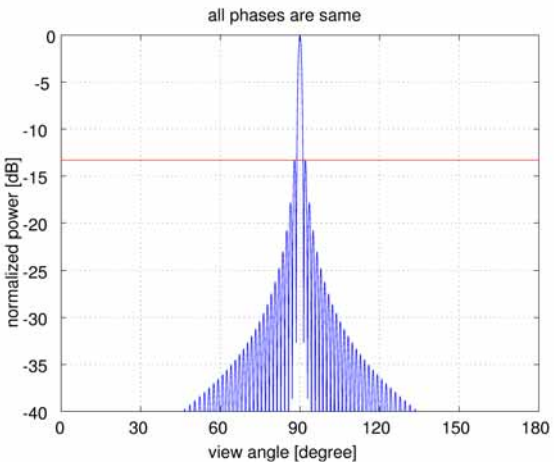


図 12　全て同相で励振した場合の放射パターン

表 2　丸めによる影響

	MSLL[dB]		効率 [%]	
	20bit から	始めから	20bit から	始めから
20bit	-22.04	-22.04	79.25	79.25
5bit	-21.64	-22.00	79.20	79.60
4bit	-19.70	-21.78	79.64	80.46
3bit	-18.63	-21.60	74.53	79.77

当然ながら 20 ビットから丸めた場合で始めから低ビット数で最適化した場合より MSLL を抑制できた結果は出なかった。そのうえ効率も悪くなっている。放射パターンの最適化を行うときには，始めから移相器の分解能による量子化誤差を考慮に入れて最適化を行うのがよいと言える。

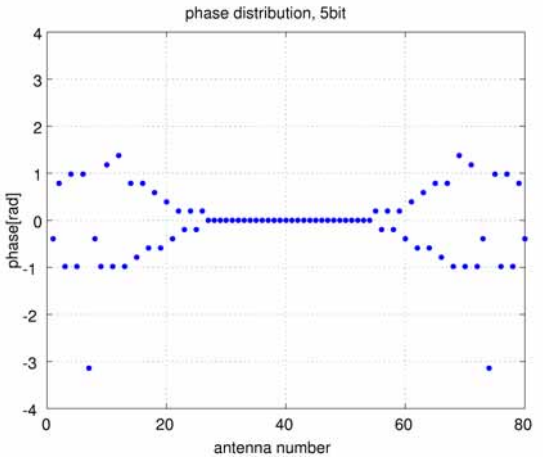


図 13　5 ビットで最適化したとき最も MSLL を抑制した解の位相分布

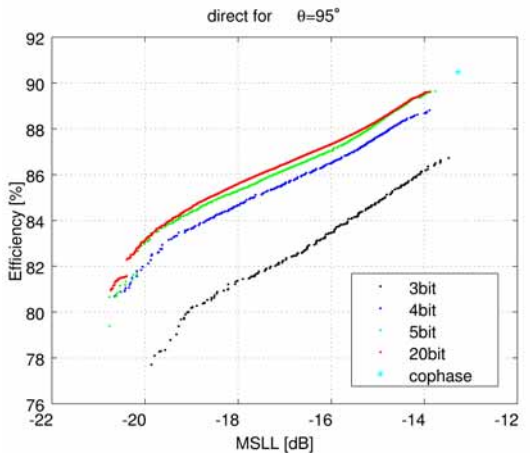


図 14　95 °方向に向けた最適化におけるパレート最適解集合

放射方向を正面とした最適化の場合は，3 ビット移相器においてもパレート最適解集合は 20 ビット移相器の場合に近い良い結果が得られる。しかし放射方向を変えると 3 ビット移相器では得られる解が明らかに劣る。実用にあたってはコストの面などから低分解能の移相器で済むにこしたことはないが，放射方向の変化への対応を考えると，本例では 4 ビットの移相器を用いることが妥当だと考えられる。

5.　2 方向送電モデルにおける最適化

我々が提案している，地上の受電点からスペクトル拡散されたパイロット信号を送る方式では，複数の地点に対応可能である [5]。最適化モデルは 1 次元 80 素子のフェーズドアレーアンテナとし、均一振幅励振を仮定して各素子アンテナの位相をアナログ移相器にて独立して制御し、このアレー表面の位相分布を最適化した。また、1 方向送電モデルから、ダイポールアンテナを用いた方が均一振幅励振における効果が大きいため、素子アンテナとしてはダイポールアンテナを用いることとし、この指向性を $\sin\theta$ で近似した。所望方向は方位角が 86° と 99° の 2 方向とし、1 方向モデルと同様に所望方向を中心として ±1.3° の領域に受電レクテナ領域を定義する。また後述のようにこの領域を広げると効率が改善されるため，この場合に関し

ても評価した。

最適化の目的は 1 方向送電の場合と同様に、それぞれの受電レクテナ領域における収集効率を最大化することと、この領域以外への不要放射抑制である。ただし、E_1[%] は所望方向 86° における電力収集効率、E_2[%] は所望方向 99° における電力収集効率を表す。

MSLL が低く，それぞれの受電領域における電力収集効率 E_1，E_2 が高い方が良いといえる。これをそれぞれの評価関数から得られたパレート最適解集合の平均値を取ることで定量的に評価する。E_1, E_2 のうち効率の小さい方が大きい方の 95%以上と，ほぼ問う電力となることも条件とした。目的に応じて，両者の電力を互いに異なったものとする最適化も可能である。

5. 1　第一サイドローブの抑制による効果

１方向送電モデルにおいて MSLL は第一サイドローブに相当し，等方性アンテナを素子アンテナとして用いた場合，第一サイドローブを抑制すると位相分布の分散が大きくなるため，必然的に電力収集効率が大きく下がってしまうということがわかった。ダイポールアンテナを用いた場合でもビーム幅が等方性アンテナに比べて増加することで効率の低下はある程度避けられる。しかし，MSLL を抑制すると効率が減少してしまうことは避けられない。

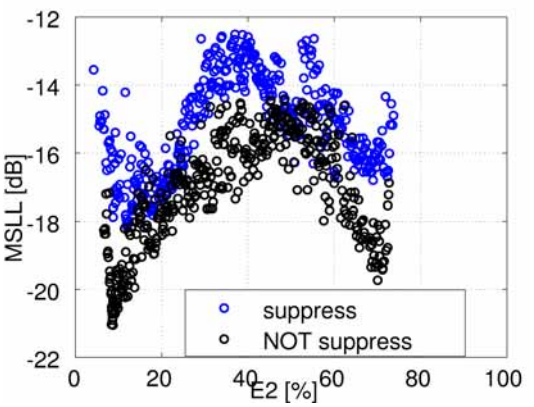


図 15　第一サイドローブを抑制しない場合の解集合（黒）と抑制した場合（青）の解集合

よってレクテナ周辺にガード領域を設けて第一サイドローブを不要放射領域からはずし（最適化対象からはずし），最適化を行った結果，電力収集効率を保った状態で新しい定義における不要放射レベルを大きく抑制することができた。2 方向送電モデルにおいても同様の考え方を用いて最適化を行うものとする。第一サイドローブを抑制しないで得られたパレート最適解集合を図 15 に黒で示す。この図から分かるように 1 方向同様，第一サイドローブを抑制しない方が，MSLL が全体的に減少していることがわかる。それぞれの所望方向における電力収集効率 E_1，E_2 と規格化された全電力収集効率 E_{std1}，MSLL の平均値を表 3 に示す。なお，規格化された全電力収集効率 E_{std1} とは以下の式であらわされる正面方向に 1 方向送電を行って受電できる電力の何割が受電可能であるかを示すものである。

$$E_{\mathrm{std1}} = \frac{E_1 + E_2}{\mathrm{E_b}} \tag{2}$$

ただし，$\mathrm{E_b}$ は正面方向に 1 方向送電を行った場合の収集効率をあらわし，90.6%となる。抑制した場合の解集合の MSLL，式 2 で定義した規格化された電力収集効率 E_{std1} の平均値がそれぞれ-15.2dB，88.6%であったのに対して，抑制しない場合のそれはそれぞれ-18.0dB，91.5%となり電力収集効率，MSLL ともに改善されていることがわかる。

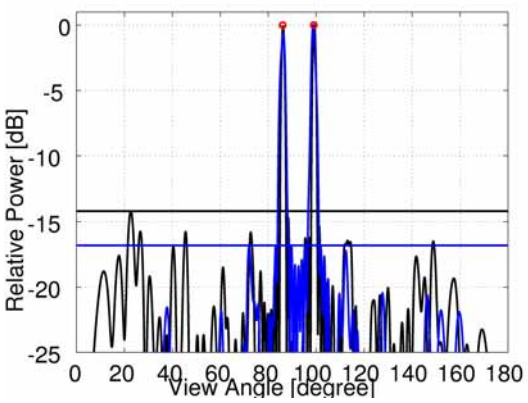


図 16　得られた二方向放射パタン。第一サイドローブを抑制しない場合（黒）と抑制した場合（青）

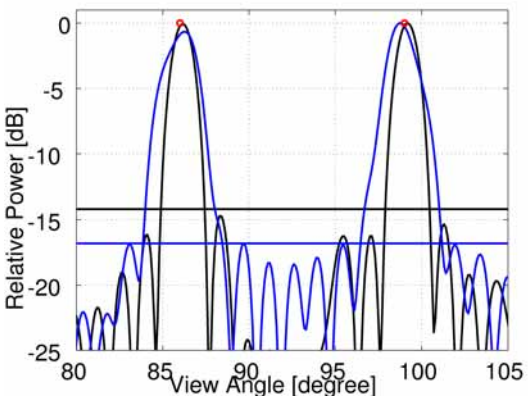


図 17　図 16 の所望方向付近の拡大図

つぎに，第一サイドローブを抑制しなかった場合において最適なパレート最適解を抽出し，その位相分布を用いてえられる放射パタンを図 16，その所望方向近傍の拡大図を図 17 に示す。それぞれの図において青が第一サイドローブを抑制しない場合で同じ制約条件で得た抑制第一サイドローブを抑制しない場合，MSLL 抑制，電力収集効率ともに優位性を示している。

表 3　第 1 サイドローブの抑制の有無による性能比較

	抑制した場合	抑制しない場合
MSLL の平均値 [dB]	-14.2	-16.8
効率 E_1 の平均値 [%]	39.0	39.9
効率 E_2 の平均値 [%]	39.3	41.9
規格化効率 E_{std1} の平均値 [%]	86.6	90.2

また，図 16 から分かるように 1 方向とは異なり，本来の第一サイドローブの位置までメインローブが広がっていることがわかる。メインローブ幅をこのように大きく広げることでサイ

ドローブ付近の電力をメインローブ近傍に集中させることができ，MSLL 抑制と電力収集効率の向上が実現できたと考えられる。つまり，2 方向送電においては第一サイドローブの位置までメインローブ幅を拡大することが可能であり，また MSLL を抑制して電力収集効率を上昇させるためには第一サイドローブ発生位置までメインローブ幅を増加させる必要があると考えられる。図 16 を実現するための位相分布を図 18 に示す。

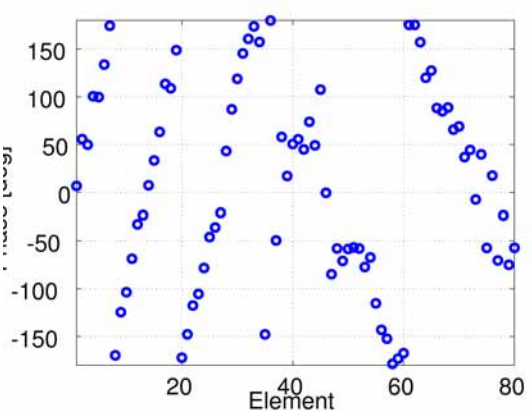


図 18　図 16 の放射パタンを実現するための位相分布

このように大きくビーム幅が増加した場合，受電範囲を広げることで収集効率をさらに上昇させることができる。上述の効率は受電範囲を所望角から ±1.3° の範囲に設定していたがこの範囲を広げて ±2.6° にした場合の電力収集効率 E_1，E_2，E_{std1} はそれぞれ 44.4%，46.6%，95.6%となり 1 方向送電に対する電力収集効率の低下を防ぐことができる。なお，E_{std1} 導出にあたっては式 2 における E_{b} は 1 方向送電において受電範囲を ±2.6° にした場合の電力収集効率 95.3%としている。

また，この考え方に基づいて受電範囲を所望角から ±2.6° の範囲に設定して最適化した。基づいて最適パタンを抽出した結果，$MSLL$，E_1，E_2，E_{std1} はそれぞれ-15.4dB，45.0%，47.3%，96.9%となり，電力収集効率は改善されているが MSLL が上昇していることが分かる。パレート最適解集合においても全体的に MSLL が上昇しているという結果が得られた。

6. 結　　論

本研究ではまず，均一振幅励振及びソフトウェアレトロディレクティブを採用するという場合を想定し，このときの SPS におけるマイクロ波送電の小規模な実証実験として，SPORTS 5.8 のビーム形成サブシステムにおける放射パターンの最適化をおこなった。

最適化において目的としたのは受電部における電力を最大化することおよびサイドローブを抑制することである。最適化により得られた MSLL を抑制した放射パターンの理論計算値と実際に測定された結果は十分一致し，全て同相で放射するときに比べて MSLL を約 6.6dB 抑制することができた。この結果から，方形パッチアンテナを用いたアレイアンテナで素子間隔が 0.6λ のときは相互結合の影響はほとんどないということが明らかになった。

次に，移相器の分解能による放射パターンへの影響を調べた。高い分解能を持った移相器で放射パターンを最適化すればそれだけ良い結果が得られることが確認できた。一方で，実際に使用される移相器の分解能がそれほど高くない場合，量子化誤差を考慮して始めからその分解能で最適化を行うほうがより良い結果を得られることがわかった。

移相器に現れるランダム誤差の影響を考慮すると，低分解能の移相器ほど MSLL 抑制効果，効率共に低下することになる。実際に SPS を建造するにあたって移相器の分解能が低く済めばそれに越したことはなく，十分な精度を持たせれば低い分解能の移相器を用いることは十分可能であると考えられる。特に放射方向の変化に対応するため，4 ビット以上の移相器を用いることが妥当だと考えられる。

二方向への送電に対応したマルチビームの形成も行い，良好な効率で最適化が行えることを示した。

現在実用化において最大の障害となるのは計算時間である。本研究においては 144 素子について，もしくは 80 素子について最適化を行ったが，十分な結果が得られるまでに多くの時間がかかった。実際の SPS ではもっと膨大な数のアンテナについて計算を行わなければならないが，このままでは実用は不可能である。今後，さらなる計算機の性能向上や，より高速にパレート最適解集合を探索できる手法の開発，高速な計算方法の開発が必要である。

謝　　辞

本研究の一部は，21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」により支援された。

文　　献

[1] DOE and NASA report, Satellite Power System, Concept Development and Evaluation Program, Reference System Report, (Oct.1978) (Published Jan.1979).
[2] 「平成 13 年度宇宙太陽発電システムの研究」成果報告書，宇宙開発事業団，2004.
[3] 藤原暉雄, 篠原真毅, 宇宙太陽発電システムの熱構造面からの一考察, 電子情報通信学会 信学技報, SPS2002-11(2003-03).
[4] J. F. DeFord and O. P. GANDHI, Phase-Only Synthesis of Minimum Peak Sidelobe Patterns for Linear and Planar Arrays, IEEE Trans. Antennas and Propagation. AP-36, No. 2, 191– 1988.
[5] 橋本弘藏，松本紘，摩湯美紀，ソフトウエアレトロディレクティブ方式による SPS，信学技報，SPS2003-15 (2004)
[6] 三菱重工業株式会社, 5.8 ギガ宇宙太陽発電 無線電力伝送システム 取扱説明書, 2002 年 3 月.
[7] E. Zitzler, M.Laumanns, L. Thiele, SPEA2:Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, TIK-Report 103, Swiss Federal Institute of Technology (May 2001).
[8] 多目的遺伝的アルゴリズム (ver 1.2) 仕様書. http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/research/mop_ga/archive/doc/moga_doc_3_5_6.pdf
[9] 京都大学生存圏研究所 電波科学計算機実験装置 PC クラスター. http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/kdk/GUIDE/PCCLUSTER/index.html
[10] 電子情報通信学会 (編), アンテナ工学ハンドブック, オーム社 (1998).
[11] 新島壮平, マイクロ波送電における均一振幅フェーズドアレーの最適化, 京都大学大学院情報学研究科修士論文 (2003).